



TITLE:

Shift力学系に対応する  $C^*\text{-環}$  の間の stable 同型 ( $C^*\text{-環}$  と K 理論)

AUTHOR(S):

武元, 英夫

---

CITATION:

武元, 英夫. Shift力学系に対応する  $C^*\text{-環}$  の間の stable 同型 ( $C^*\text{-環}$  と K 理論). 数理解析研究所講究録 1983, 488: 43-58

ISSUE DATE:

1983-05

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/103492>

RIGHT:

# Shift力学系に対応する $C^*$ 環の間の stable 同型

東北大学教養 武元英夫 (Hideo Takemoto)

無理数  $\alpha$  に対して, 1次元トーラス  $T = \{z \in \mathbb{C} : |z| = 1\}$  上  
 角度  $2\pi\alpha$  の回転  $U_\alpha$  は  $T$  上の変換群として整数全体からなる群  
 $\mathbb{Z}$  が作用している。これに対応する変換群  $C^*$ 環  $A_\alpha$  が, いわ  
 ゆる, 無理数回転  $C^*$ 環と呼ばれるものである。このとき,  $A_\alpha$   
 は次のような  $C^*$ 環と考えられる。

すなわち,  $L^2(T)$  を  $T$  上の2乗可積分関数全体からなるヒル  
 ベルト空間とすると,  $L^2(T)$  上の2つのユニタリ作用素  $U_\alpha, S$   
 から生成される  $C^*$ 環が  $A_\alpha$  である。いま,  $e_n(z) = e^{2\pi i n \cdot}$  とす  
 ると  $\{e_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$  は  $L^2(T)$  での C.N.O.S. であり, ユニタリ作用  
 素  $S$  を  $S e_n = e_{n+1}$  ( $n \in \mathbb{Z}$ ) で定義する。さらに  $T$  上の角度  
 $2\pi\alpha$  の回転から導入される  $L^2(T)$  上のユニタリ作用素を前と同  
 じ記号で  $U_\alpha$  とする。このとき,  $A_\alpha = C^*(U_\alpha, S)$  とは、て  
 いる。ここで,  $C^*(U_\alpha, S)$  は  $U_\alpha, S$  から生成される  $C^*$ 環と意  
 味している。

特に,  $U_\alpha e_n = e^{2\pi i n \alpha} e_n$  ( $n \in \mathbb{Z}$ ) となっている. このことより, 一般のヒルベルト空間  $\mathcal{H}$  の c.n.o.s  $\{e_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$  に対して,  $S e_n = e_{n+1}$ ,  $U_\alpha e_n = e^{2\pi i n \alpha} e_n$  ( $n \in \mathbb{Z}$ ) となる2個のユニタリ作用素  $S$ ,  $U_\alpha$  に対して,  $A_\alpha$  と  $C^*(U_\alpha, S)$  は  $C^*$  同型である.

上のことより, 今後は, ヒルベルト空間  $\mathcal{H}$  は c.n.o.s  $\{e_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$  をもつものとしていく.  $\mathcal{H}$  上のユニタリ作用素  $S: S e_n = e_{n+1}$  ( $n \in \mathbb{Z}$ ) を shift 作用素といい, 常用されていく. さらに,  $e^{2\pi i x} \in \mathbb{T}$  に対して, ユニタリ作用素  $U_x$  を  $U_x e_n = e^{2\pi i n x} e_n$  ( $n \in \mathbb{Z}$ ) で定義する.  $\mathbb{T}$  において離散位相を考えているとき,  $T_\alpha$  と書くことにする.  $T_\alpha$  での部分群  $G$  が与えられると, これは shift カルculus  $\Sigma_G = (\hat{G}, \sigma, \varphi)$  に対応している(くわしくは [3] を参照). そこで,  $S$  と  $\{U_x; e^{2\pi i x} \in G\}$  から生成される  $B(\mathcal{H})$  の  $C^*$  部分環を  $C^*(\Sigma_G)$  と書いていくことにする. すると,  $C^*(\Sigma_G)$  はクロス積  $C(\mathbb{T}) \times G$  と同型である. 特に,  $G$  が有限生成であり,  $\mathbb{Q}$  上1次独立な無理数  $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$  (ここでの1次独立は  $\{1, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$  が  $\mathbb{Q}$  上1次独立になっていることとする) に対して  $G = \{e^{2\pi i k l \alpha_l}; k \in \mathbb{Z}, l = 1, 2, \dots, n\}$  のとき  $C^*(\Sigma_G)$  は  $C(\mathbb{T}) \times \mathbb{Z}^n$  と同型である.

今  $G_1, G_2$  を  $T_\alpha$  の部分群とするとき,  $C^*(\Sigma_{G_1})$  と  $C^*(\Sigma_{G_2})$  が  $*$ -同型になるのは  $G_1 = G_2$  であることは, 段階をえることによ

って, Rieffel [6], Pimsner-Voiculescu [4], Riedel [5], 河村-武元 [3] によって示された。そこで, 本論では,  $C^*(\Sigma_{G_1})$  と  $C^*(\Sigma_{G_2})$  が *stable* 同型になるのはどういう場合か, ということを中心にして進める。結果の証明は, 頁数の制限もあるので本稿ではすべて省略することにし, 追って発表される論文でくわしく書く予定ですので, 興味のある方々には申し訳ありませんが, そちらと見て下さい。本稿は, 河村氏との共同の仕事からなっていることと付け加えておきます。

### 1. 前段階までの話.

今後, 群  $G$  はすべて  $\Gamma_n$  の部分群とする。  $G$  が有限群ならば, ある自然数  $n$  が存在し,  $C^*(\Sigma_G)$  は  $C^*(S) \otimes B(\ell_n)$  と同型である。ここで,  $\ell_n$  は  $n$  次元ヒルベルト空間である。  $G$  が無限群のときは,  $C^*(\Sigma_G)$  は単純  $C^*$  環でかつ唯一つのトレース  $\text{Tr}$  をもつ。この  $\text{Tr}$  を  $\bigcup_{n=1}^{\infty} C^*(\Sigma_G) \otimes B(\ell_n)$  に拡張することによって  $C^*$  環  $C^*(\Sigma_G)$  の  $K_0$ -群  $K_0(C^*(\Sigma_G))$  から  $\mathbb{R}$  への準同型写像が得られる。そこで, この準同型写像の値域を  $R_{\text{Tr}}(C^*(\Sigma_G))$  とおくと, 次の定理が得られる。

定理 1 (河村-武元 [3], Riedel [5], Rieffel [6]).

(1)  $G$  を  $\Gamma_n$  の無限部分群とし,  $\text{Tr}$  を  $C^*(\Sigma_G)$  のトレースとす

る。そのとき,  $R_{\mathbb{T}}(C^*(\Sigma_G)) = \{x \in \mathbb{R}; e^{2\pi i x} \in G\}$  である。

(2)  $G_1, G_2$  を 2 つの  $\mathbb{T}_\alpha$  の無限部分群とする。このとき, (1) の結果から,  $C^*(\Sigma_{G_1})$  と  $C^*(\Sigma_{G_2})$  が  $*$ -同型である必要十分条件は  $G_1 = G_2$  である。

定理 1 (2) から,  $G$  が無限群でない場合をも含めて,

$$R_G = \{x \in \mathbb{R}; e^{2\pi i x} \in G\}$$

とおく。すると,  $R_G$  は  $\mathbb{R}$  の部分群であり,  $R_G \supset \mathbb{Z}$  である。

議論上の便利のために次の概念を記しておく。

$\{\alpha_i\}_{i \in I}$ : 次のような性質をもつ無理数の集合とする。

$\{\alpha_i\}_{i \in I}$  のどんな有限集合  $\{\alpha_{i_k}\}_{k=1}^q$  に対しても,  $\{1, \alpha_{i_1}, \dots, \alpha_{i_q}\}$  は  $\mathbb{Q}$  上 1 次独立である。

$\{p_j\}_{j=1}^N$ :  $1 \leq N \leq +\infty$ , 自然数の可付番集合。

$G(\{p_j\}_{j=1}^N; \{\alpha_i\}_{i \in I})$ :  $\{e^{2\pi i/p_j}, e^{2\pi i \alpha_i}; 1 \leq j \leq N, i \in I\}$

から生成される  $\mathbb{T}_\alpha$  の部分群。

特に,  $N=1, p_1=p$  のとき,  $G(1/p; \{\alpha_i\}_{i \in I})$  とかく。

これから,  $C^*(1; \{\alpha_i\})$  は無理数回転  $C^*$  環  $A_\alpha$  である。かつ,

$$R_{G(1; \{\alpha_i\})} = \mathbb{Z} + \mathbb{Z}\alpha \quad \text{である。}$$

定理1によつて, shift 力学系に対応する  $C^*$ 環  $C^*(\Sigma_G)$  の間の同型に対する問題は解決されたことになった。そこで, stable 同型について考えていこう。

定義2. 無限可分なヒルベルト空間  $K$  上のコンパクト作用素全体の  $C^*$ 環を  $C(K)$  とする。2つの  $C^*$ 環  $A, B$  が stable 同型であるとは, テンソル積  $A \otimes C(K)$  と  $B \otimes C(K)$  が  $*$ -同型であることである。

2つの無理数回転  $C^*$ 環  $C^*(\Sigma_{G(1;\alpha)})$ ,  $C^*(\Sigma_{G(1;\beta)})$  に対して  $R_{G(1;\alpha)} = \mathbb{Z} + \mathbb{Z}\alpha$  と  $R_{G(1;\beta)} = \mathbb{Z} + \mathbb{Z}\beta$  は常に群同型である。これから, 群  $R_G$  の間の群同型によつて  $C^*$ 環  $C^*(\Sigma_G)$  を分類することは不可能である。そこで, Rieffel は  $\mathbb{R}$  での通常の順序で,  $\mathbb{Z} + \mathbb{Z}\alpha$  を順序群とみることによつて, 無理数回転  $C^*$ 環の間の stable 同型について議論をしている[6]。それには次のような Morita equivalence の考えを用いている。すなわち, 2つの  $C^*$ 環  $A, B$  が単位元をもっているとするとき,  $A$  と  $B$  が stable 同型であることと  $A$  と  $B$  が Morita equivalent であることが同値である。そして,  $A$  と  $B$  が stable 同型であるならば,  $A$ - $B$ -equivalence bimodule  $X$  が存在する。今,  $A$  が trace  $\tau$  をもっているとするならば, 線形汎関数  $\tau_X$  :  $\tau_X(\langle x, y \rangle_B) =$

$= \tau(\langle y, x \rangle_A)$  for  $x, y \in A$  は  $B$  上のトレースとなり,  $\tilde{\tau}_x(K_0(B))$   
 $= \tilde{\tau}(K_0(A))$  となっている. ここで,  $\tilde{\tau}, \tilde{\tau}_x$  は  $\tau, \tau_x$  から導  
 入される  $K_0(A), K_0(B)$  から  $\mathbb{R}$  への準同型写像を表わす.  
 今,  $A$  と  $B$  がそれぞれ一意なるトレース  $\tau, \tau'$  をもつとす  
 と, 正数  $r$  が存在し,  $\tau_x = r\tau'$  となっている. 従って,  $\tilde{\tau}(K_0(A))$   
 $= r\tilde{\tau}'(K_0(B))$  となり,  $\tilde{\tau}(K_0(A))$  と  $\tilde{\tau}'(K_0(B))$  は順序群同型とな  
 っている. そこで, 次の定義を与える.

定義3.  $R_1, R_2$  を  $\mathbb{R}$  の部分群とする.  $R_1$  から  $R_2$  上への群同  
 型写像  $\varphi$  が順序群同型写像であるとは  $R_1$  におけるすべての正  
 数  $r$  に対して  $\varphi(r) > 0$  になることである. このような  $\varphi$  が存  
 在するとき,  $R_1$  と  $R_2$  は順序群同型であるという.

定義3での性質を考えることによって Rieffel は次の結果  
 を得ている. これには, Green [2], Shen [7] の結果が多い  
 に用いられている.

補題4 (Rieffel [6]). 単位元をもつ二つの  $C^*$  環  $A, B$  が一意  
 なトレース  $\tau, \tau'$  をそれぞれもつとする. そのとき,  $A$  と  $B$   
 が stable 同型であるならば,  $\tilde{\tau}(K_0(A))$  と  $\tilde{\tau}'(K_0(B))$  は順序群同  
 型である. 特に,  $A = C^*(\Sigma_{G(1; \alpha_1)})$ ,  $B = C^*(\Sigma_{G(1; \beta_1)})$  のときは

$C^*(\Sigma_{G(1;1\alpha)})$  と  $C^*(\Sigma_{G(1;1\beta)})$  が stable 同型であることと  $R_{G(1;1\alpha)} = \mathbb{Z} + \mathbb{Z}\alpha$  と  $R_{G(1;1\beta)} = \mathbb{Z} + \mathbb{Z}\beta$  が順序群同型であることは同値である.

上の結果から我々は次の予想をもつ.

予想.  $G_1$  と  $G_2$  を  $T_\alpha$  での部分群とする. このとき,  $C^*(\Sigma_{G_1})$  と  $C^*(\Sigma_{G_2})$  が stable 同型であることと  $R_{G_1}$  と  $R_{G_2}$  は順序群同型であろう.

本稿では上の予想に対する肯定的な解答を幾つかの場合について与えるが, まだ完全な解決には到達できていないのが残念なことである.

## 2. 主要結果.

$G_1$  と  $G_2$  を  $T_\alpha$  の部分群とする. 今,  $R_{G_1}$  と  $R_{G_2}$  が順序群同型かあるいは  $C^*(\Sigma_{G_1})$  と  $C^*(\Sigma_{G_2})$  が stable 同型であるとき,  $G_1$  または  $G_2$  の一方が有限群ならば他方も有限群であることは明らかである. 今,  $G$  を有限群とすると,  $C^*(\Sigma_G)$  は  $C^*(S) \otimes B(\text{Id}_n)$  に  $*$ -同型である. これから, 次の命題が得られる.



命題 5.  $G_1, G_2$  を  $T_d$  の部分群とし,  $G_1, G_2$  の一方が有限群であるとする. そのとき,  $C^*(\Sigma_{G_1})$  と  $C^*(\Sigma_{G_2})$  が stable 同型である必要十分条件は  $R_{G_1}$  と  $R_{G_2}$  が順序群同型になることである.

命題 5 から, 今後, 扱う群  $G$  は無限群としていく. すうと  $C^*(\Sigma_G)$  は一意なトレースを持ち,  $R_G$  はそのトレースから導入される  $K_0(C^*(\Sigma_G))$  から  $\mathbb{R}$  への準同型写像の値域となっていく. 補題 4 によって, 2 つの群  $G_1, G_2$  に対して,  $C^*(\Sigma_{G_1})$  と  $C^*(\Sigma_{G_2})$  が stable 同型ならば  $R_{G_1}$  と  $R_{G_2}$  は順序群同型となっている. 従って, 予想の解決には  $R_{G_1}$  と  $R_{G_2}$  が順序群同型るとき  $C^*(\Sigma_{G_1})$  と  $C^*(\Sigma_{G_2})$  が stable 同型になっているかと調べればよい.

最初に  $T_d$  でのねじれ群  $G$  を扱う. すうと,  $\mathbb{Z} < R_G < \mathbb{Q}$  となっている. そこで今,  $R_1$  を  $\mathbb{Z} < R_1 < \mathbb{Q}$  なる  $\mathbb{R}$  の部分とし, さらに  $\mathbb{R}$  の部分群  $R_2$  を与える. さらに,  $R_1$  と  $R_2$  が群同型であると, 群同型写像  $g$  を与えておく. もし,  $\mathbb{Z} < R_2$  ならば  $g(x) = xg(1)$  for  $x \in R_1$  かつ  $1/g(x) \in R_1 < \mathbb{Q}$  である. 逆に  $1/g(1) \in R_1 < \mathbb{Q}$  ならば  $R_2 = g(R_1) = R_1 g(1) > \mathbb{Z}$  である. これから,  $\mathbb{Z} < R_2$  である必要十分条件は  $1/g(1) \in R_1$  になることである.

前述のことから,  $\mathbb{Z}$  を含む  $\mathbb{R}$  の部分群の間の同型を議論に

するとき, 2つの群  $R_1$  と  $R_2$  のうち一方が  $\mathbb{Q}$  に含まれるとき, 他方も  $\mathbb{Q}$  に含まれている. そこで, 次の補題が得られる.

補題6.  $R_1, R_2$  を  $\mathbb{Z} \subset R_i \subset \mathbb{Q}$  ( $i=1, 2$ ) なる  $\mathbb{R}$  の部分群とする. そのとき,  $R_1$  と  $R_2$  が順序群同型である必要十分条件は次の性質を満たす正なる有理数  $q_0/p_0$  が存在することである. すなわち,  $p_0/q_0 \in R_1$ ,  $q_0/p_0 \in R_2$ ,  $R_1(q_0/p_0) = R_2$ .

補題6 から次の補題を得る. これは後で有意義な性質をもつ (収じれのない群の場合においても有意義な役割をはたす).

補題7.  $G_1, G_2$  を  $\Gamma_n$  の部分群とする. もし, 次の性質を満たす自然数  $p_0, q_0$  :  $(p_0, q_0) = 1$ ,  $R_{G_1} q_0 = R_{G_2} p_0$ ,  $1/q_0 \in R_{G_1}$ ,  $1/p_0 \in R_{G_2}$  が存在するとき,  $C^*$ 環  $C^*(\Sigma_{G_1})$  と  $C^*(\Sigma_{G_2})$  は stable 同型である.

以上より, 無限生成群で収じれ群の場合には予想が肯定的に解決されることになる.

定理8.  $G_1$  と  $G_2$  を  $\Gamma_n$  での無限生成な収じれ群であるとする. そのとき, 2つの  $C^*$ 環  $C^*(\Sigma_{G_1})$  と  $C^*(\Sigma_{G_2})$  が stable 同型

である必要十分条件は  $R_{G_1}$  と  $R_{G_2}$  が 順序群同型になることである.

命題5と定理8によって, ねじれ群に対応している  $C^*$ 環  $C^*(\Sigma_G)$  の分類が完全に決定されたことになる. 次は, ねじれ群でない群に対応している  $C^*$ 環  $C^*(\Sigma_G)$  について考えよう. これについては, ねじれのない部分が有限生成の場合については肯定的な解答を与えるが, そうでない場合については, いまだに解決されないうちに残されている. まず, 有限生成な無限群を扱っていきう. 1つはねじれのない群であり, 1つはねじれのない群でない群に対応している  $C^*$ 環を調べていきう. そこで,  $G$  をねじれのない群で有限生成だとすると,  $G$  は  $G(1; \{\alpha_1, \dots, \alpha_k\})$  の形の群であり, そうでない場合は  $G(\frac{1}{p}; \{\alpha_1, \dots, \alpha_k\})$  の形の群である.

まず,  $G = G(\frac{1}{p}; \{\alpha_1, \dots, \alpha_k\})$  とし,  $G'$  を  $\{e^{2\pi i p \alpha_j}; j=1, 2, \dots, k\}$  から生成される群とする. すなわち,  $G' = G(1; \{p\alpha_1, p\alpha_2, \dots, p\alpha_k\})$  である. そのとき,  $G'$  はねじれのない群であり,  $R_{G/p} = R_{G'}$  となっている.  $R_{G/p} = R_{G'}$  という事から, 補題7によって  $R_G$  と  $R_{G'}$  は順序群同型でありかつ  $C^*(\Sigma_G)$  と  $C^*(\Sigma_{G'})$  は stable 同型となっている. 従って, 定義3の前に述べた注意と上の事実から, 群  $G_1, G_2$  は共に, 有限生成なねじれ

のない群の場合について考えればよい。この時、 $R_{G_1}$  と  $R_{G_2}$  が順序群同型であるとする、 $G_1, G_2$  は同じ個数の無理数に対応している。すなわち、 $G_1 = G(1; \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k\})$ ,  $G_2 = G(1; \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k\})$  となっている。今、 $\{1, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k\}$ ,  $\{1, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k\}$  は  $\mathbb{Q}$  上線形独立であるから、 $C^*(\Sigma_1)$ ,  $C^*(\Sigma_{G_2})$  はそれぞれ  $C(\mathbb{T}) \times_{\{\alpha_1, \dots, \alpha_k\}} \mathbb{Z}^k$ ,  $C(\mathbb{T}) \times_{\{\beta_1, \dots, \beta_k\}} \mathbb{Z}^k$  に\*-同型である。ここで、接合積の action は、それぞれ、 $\{\alpha_1, \dots, \alpha_k\}$ ,  $\{\beta_1, \dots, \beta_k\}$  による  $\mathbb{T}$  上の回転によって導入されるものと考えている。すると Green の定理 [ ; 定理 ] とその証明から  $C^*(\Sigma_{G_1}) \otimes C(L^2(\mathbb{T}^k))$  と  $C^*(\Sigma_{G_2}) \otimes C(L^2(\mathbb{T}^k))$  はそれぞれ、 $C(\mathbb{T}^{k+1}) \times_{\{1, \alpha_1, \dots, \alpha_k\}} \mathbb{R}^k$  と  $C(\mathbb{T}^{k+1}) \times_{\{1, \beta_1, \dots, \beta_k\}} \mathbb{R}^k$  に\*-同型である。ここで、上の接合積での  $\mathbb{R}^k$  の  $C(\mathbb{T}^{k+1})$  上の action は次のような多重流れによる変換である。このとき 1 次元トーラス  $\mathbb{T}$  を 0 と 1 と同一視して考えた場合の区間  $[0, 1)$  と同一視することと、 $\mathbb{T}^{k+1}$  の各座標は 1 とモジュールとして考えていく。その時、上での  $\mathbb{R}^k$  の  $C(\mathbb{T}^{k+1})$  上の action は次の多重流れによっての変換である：

$$\begin{aligned}
 (t_1, \dots, t_k) \in \mathbb{R}^k ; \quad \mathbb{T}^{k+1} \ni (x_1, \dots, x_k, x_{k+1}) \\
 \longrightarrow (x_1 + t_1, \dots, x_k + t_k, x_{k+1} + t_1 \alpha_1 + \dots + t_k \alpha_k)
 \end{aligned}$$

従って,  $C^*(\Sigma_{G_1})$  と  $C^*(\Sigma_{G_2})$  が stable 同型である必要十分条件は  $C(\mathbb{T}^{k+1}) \times_{\{1, \alpha_1, \dots, \alpha_k\}} \mathbb{R}^k$  と  $C(\mathbb{T}^{k+1}) \times_{\{1, \beta_1, \dots, \beta_k\}} \mathbb{R}^k$  が  $*$ -同型になることである. そこで,  $C^*(\Sigma_{G_1})$  と  $C^*(\Sigma_{G_2})$  が stable 同型であることと  $\{1, \alpha_1, \dots, \alpha_k\}, \{1, \beta_1, \dots, \beta_k\}$  による  $\mathbb{T}^{k+1}$  上の軌跡が  $\mathbb{T}^{k+1}$  上の同型写像によって同型になっていることである. そこで,  $k=1$  の場合での Shen の定理の一般化を与えておこう.

補題 9.  $R_{G_1} = \mathbb{Z} + \mathbb{Z}\alpha_1 + \dots + \mathbb{Z}\alpha_k$  と  $R_{G_2} = \mathbb{Z} + \mathbb{Z}\beta_1 + \dots + \mathbb{Z}\beta_k$  が順序群同型であるとすれば, 次の性質(\*)を満たす行列  $(a_{ij}) \in GL(k+1, \mathbb{Z})$  が存在する; 各  $l = 1, 2, \dots, k$  に対して,

$$(*) \quad \alpha_l = \left( \sum_{j=1}^k \beta_j a_{jl} + a_{k+1,l} \right) / \left( \sum_{j=1}^k \beta_j a_{j,k+1} + a_{k+1,k+1} \right).$$

次に, 補題 9 の性質(\*)を満たす行列  $(a_{ij}) = A \in GL(k+1, \mathbb{Z})$  が与えられたとすると, その時,  $\mathbb{T}^{k+1}$  の共役群が  $\mathbb{Z}^{k+1}$  である事実を経由することによって,  $A$  は  $\mathbb{T}^{k+1}$  上の同型写像となっている. さらに, この同型写像によって,  $\{1, \alpha_1, \dots, \alpha_k\}$  による  $\mathbb{T}^{k+1}$  上の軌跡が  $\{1, \beta_1, \dots, \beta_k\}$  による  $\mathbb{T}^{k+1}$  上の軌跡に移ることがわかる. 以上から, 次の定理を得る.

定理10.  $G_1, G_2$  を  $\mathbb{T}_\alpha$  での有限生成な無限群とする. そのとき,  $C^*(\Sigma_{G_1})$  と  $C^*(\Sigma_{G_2})$  が stable 同型である必要十分条件は  $R_{G_1}$  と  $R_{G_2}$  が順序群同型になることである.

以上から, 次のまとめができる. 定理8によって(命題5と共に考えると) ねじれ群に対しては予想は肯定的に解決されたことになった. ねじれのない群に対しては有限生成群に対しては肯定的な解答を与えることができたが, 一般の, 無限生成群まで含めると, ねじれのない群に対するものに対しては完全な解決にまで達していない. しかし, 補題7を考えると, ねじれ群でない2つの群に対しても, 補題7の性質を満すならば(この時,  $R_{G_1}$  と  $R_{G_2}$  は順序群同型となっていり)  $C^*(\Sigma_{G_1})$  と  $C^*(\Sigma_{G_2})$  は stable 同型になっている. このとき順序群同型写像は  $\mathbb{Z}$  での1を有理数  $q/p$  に移している場合である. しかし,  $\mathbb{T}_\alpha$  での2つの部分群  $G_1, G_2$  に対して,  $R_{G_1}$  と  $R_{G_2}$  が順序群同型であったとしても1は有理数に移っているとは限らない. 例えば,

例.  $\alpha$  を無理数として,  $G_1 = \bigcup G(1, 1, \frac{\alpha}{2^n})$ ,  $G_2 = \bigcup G(\frac{1}{2^n}, 1, \frac{1}{2^n})$  とすると,  $R_{G_1} = \bigcup \{ \mathbb{Z} \frac{\alpha}{2^n} + \mathbb{Z} \}$ ,  $R_{G_2} = \bigcup \{ \mathbb{Z} \frac{1}{2^n} + \mathbb{Z} \frac{1}{2} \}$  である. 今,  $R_{G_1}$  から  $R_{G_2}$  上への写像  $\varphi$  を  $R_{G_1} \ni x \rightarrow \frac{x}{2} \in R_{G_2}$  によって定義すると,  $\varphi$  によって  $R_{G_1}$  と  $R_{G_2}$  は順序群同型にな

っている。  $G_1$  は収じれのはい群であるが、  $G_2$  は収じれの部分がある群である。

上の例から次のような群を考えてみる。  $\{p_n\}$  を  $p_n | p_{n+1}$  を満たす自然数列とする。今、  $G_1 = \bigcup G(1; \{\frac{\alpha}{p_n}\})$  ,  $G_2 = \bigcup G(\frac{1}{p_n}; \{\frac{1}{2}\})$  とおくと、  $IR_{G_1}$  と  $IR_{G_2}$  は順序群同型となっている。  $C^*(\Sigma_{G_1})$  と  $C^*(\Sigma_{G_2})$  をみると、  $p_n | p_{n+1}$  ( $n=1, 2, \dots$ ) ということから、

$$C^*(\Sigma_{G_1}) = \varinjlim C^*(\Sigma_{G(1; \{\frac{\alpha}{p_n}\})})$$

$$C^*(\Sigma_{G_2}) = \varinjlim C^*(\Sigma_{G(\frac{1}{p_n}; \{\frac{1}{2}\})})$$

である。ここで、上で考える帰納的極限は包含関係によって導入されるものである。補題7によって  $C^*(\Sigma_{G(\frac{1}{p_n}; \{\frac{1}{2}\})})$  と  $C^*(\Sigma_{G(1; \{\frac{p_n}{2}\})})$  は stable 同型である。さらに、Rieffelの結果(すなわち、定理1)から、  $C^*(\Sigma_{G(1; \{\frac{p_n}{2}\})})$  と  $C^*(\Sigma_{G(1; \{\frac{\alpha}{p_n}\})})$  は stable 同型となっている。これらのことと、帰納的極限の性質を考えることによって次の命題が得られる。

命題11.  $\alpha$  を無理数とする。  $\{p_n\}$  を  $p_n | p_{n+1}$  ( $n=1, 2, \dots$ ) を満たす自然数列とする。  $\alpha$  ,  $\{p_n\}$  に対して  $\mathbb{T}_\alpha$  での2つの部分群  $G_1$  ,  $G_2$  を次のように定義する。

$G_1 = \bigcup G(1; \{\frac{1}{p_n}\})$ ,  $G_2 = \bigcup G(\frac{1}{p_n}; \{\frac{1}{2}\})$  とおくと,  
 $R_{G_1}$  と  $R_{G_2}$  は順序群同型であるが, さらに,  $C^*$ 環  $C^*(\Sigma_{G_1})$   
 と  $C^*(\Sigma_{G_2})$  は stable 同型となる.

以上が前述の予想に対する肯定的な解答が与えられる部分である. 従って, 未解決の部分は次の二つの群  $G$  に対するものである. すなわち, 収じゆのない部分が無限生成である一般の場合, 収じゆのない部分が有限生成であって, 収じゆの部分が無限生成である群に対する場合の二つが残されたことになる.

さらに, 問題として考えられるのは,  $C^*(\Sigma_G)$  は AF-環に埋めこめられるかがある.

### 参考文献

- [1] D.E. Evans, Gauge actions on  $\mathcal{O}_A$ , J. Operator Theory, 7(1982), 79-100.
- [2] P. Green, The local structure of twisted covariance algebras, Acta Math., 140(1978), 191-250.
- [3] S. Kawamura and H. Takemoto,  $C^*$ -algebras associated with shift dynamical systems, preprint.
- [4] M. Pimsner and D. Voiculescu, Imbedding the irrational rotation  $C^*$ -algebra into an AF-algebra, J. Operator Theory, 4(1980), 201-210.
- [5] N. Riedel, Classifications of the  $C^*$ -algebras associated with minimal



- rotations, Pacific J. Math., 101(1982), 153-162.
- [6] M.A. Rieffel,  $C^*$ -algebras associated with irrational rotations, Pacific J. Math., 93(1981), 415-429.
- [7] C.L. Shen, On the classification of the ordered groups associated with approximately finite dimensional  $C^*$ -algebras, Duke Math. J., 46 (1979), 613-633.